

(11) Publication number: JP-A-2003-110179

(43) Date of publication of Application: 11.04.03

(21) Application number: P2001-301951

(22) Date of filing: 28.09.01

5 (71) Applicant: FUJITSU LIMITED

(72) Inventor: MURO SHINICHIROU,

HAYASHI ETSUKO

[Title of the Invention]

Method and Device for Optical Amplification

10 [Abstract]

[Problems]

The present invention relates to an optical amplification device, and its main objective is to provide a method and a device for optical amplification capable of maintaining the wavelength characteristic of a gain constant and obtaining a wide input dynamic range.

[Solutions]

The optical amplification device comprises a first optical amplification unit 13 further comprising a Raman amplification medium 1 and a first pumping light source 3 pumping the Raman amplification medium 1; a second optical amplification unit 14 further comprising an optical amplification medium 7 optically connected after the first optical amplification unit, and pumping light sources 5 and 8 pumping the optical amplification medium 7; and a control unit controlling the gain of the first optical amplification unit in such a way as to kill the output power fluctuations of the first optical amplification unit due to the input power fluctuations of the first optical amplification unit.

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-110179

(P2003-110179A)

(43)公開日 平成15年4月11日(2003.4.11)

(51)IntCl. ⁷	識別記号	FI	デマコード(参考)
H01S 3/30		H01S 3/30	2K002
G02F 1/35	501	G02F 1/35	501 5F072
H01S 3/06		H01S 3/06	B 5K002
3/10		3/10	Z
3/23		3/23	

審査請求 未請求 請求項の数4 OL (全15頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2001-301951(P2001-301951)

(22)出願日 平成13年9月28日(2001.9.28)

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72)発明者 室 真一郎

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(72)発明者 林 悦子

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74)代理人 100075384

弁理士 松本 昂

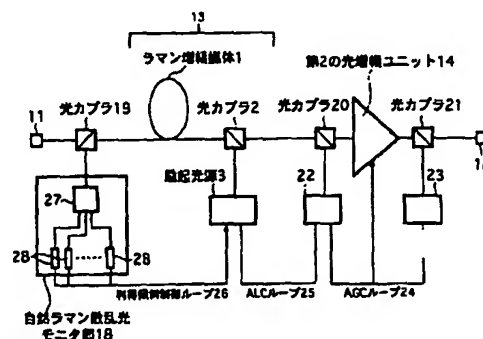
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光増幅のための方法及び装置

(57)【要約】

【課題】 本発明は光増幅のための装置に関し、利得の波長特性を一定に維持し且つ広い入力ダイナミックレンジを得ることができる光増幅のための方法及び装置の提供が主な課題である。

【解決手段】 ラマン増幅媒体1及びこれをポンピングする第1のポンプ光源3を含む第1の光増幅ユニット13と、第1の光増幅ユニットの後段に光学的に接続され光増幅媒体7及びそれをポンピングする第2のポンピング光源5、8を含む第2の光増幅ユニット14と、第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように第1の光増幅ユニットの利得を制御する制御ユニットとから構成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの後段に光学的に接続され、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による前記第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように前記第1の光増幅ユニットの利得を制御する制御ユニットとを備えた装置。

【請求項2】 ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットにより信号光を増幅するステップと、光増幅ユニット及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットにより前記第1の光増幅ユニットから出力された信号光を増幅するステップと、

前記第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による前記第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように前記第1の光増幅ユニットの利得を制御するステップとを備えた方法。

【請求項3】 ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの後段に光学的に接続され、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットと、前記ラマン増幅媒体で生じる自然ラマン散乱光のスペクトルを検出する手段とを備えた装置。

【請求項4】 前記自然ラマン散乱光は前記第1の光増幅ユニットで増幅されるべき光の入力側より取り出される請求項3記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光増幅のための方法及び装置に関する。

【0002】

【従来の技術】 比較的多量の情報を伝送するために、光ファイバ伝送路を用いた光通信システムが使用されている。そのために、低損失（例えば0.2 dB/km）な光ファイバが光ファイバ伝送路として製造され、使用されている。加えて、長距離の伝送を可能にするために、光ファイバ伝送路における損失を補償するための光増幅器が使用されている。

【0003】 従来の光増幅器は、利得帯域を提供するためにポンプ光（励起光）により励起される光増幅媒体を備えている。光増幅媒体及びポンプ光は、これらが信号光の波長を含む利得帯域を提供するように選ばれる。その結果、光増幅媒体内を信号光が伝搬するのに従って信号光は増幅される。

【0004】 例えば、エルビウムドープファイバ増幅器

（EDFA）は、光増幅媒体としてエルビウムドープファイバ（EDF）を備えている。ポンプ光源が予め定められた波長を有するポンプ光をEDFに供給する。ポンプ光の波長を0.98 μ m帯或いは1.48 μ m帯に設定しておくことによって、1.55 μ mの波長帯を含む利得帯域が得られる。その結果、1.55 μ m波長帯の信号光は増幅される。

【0005】 さらに、1本の光ファイバによる伝送容量を増大させるための技術として、波長分割多重（WDM）が知られている。WDMを採用したシステムにおいては、異なる波長を有する複数の光キャリアがデータにより個別に変調される。各変調されたキャリアは、光信号を伝送するWDMシステムの1つのチャネルを与える。これらの光信号（即ち変調されたキャリア）は、次いで、光マルチプレクサにより波長分割多重され、WDM信号光が得られる。WDM信号光は、次いで、光ファイバ伝送路を介して伝送される。伝送路を介して受信されたWDM信号光は、光デマルチプレクサにより個々の光信号に分けられる。従って、これら個々の光信号に基づいてデータが検出され得る。このように、WDMを適用することによって、WDMのチャネル数に従って1本の光ファイバの伝送容量の増大が可能になる。

【0006】 WDMを採用した光通信システムにおいて、伝送路に沿って光増幅器が挿入されると、伝送距離は、利得傾斜（ゲインチルト）または利得偏差で代表される光増幅器の利得の波長特性によって制限される。例えば、EDFAにおいては、1530 nm～1610 nmの帯域に実用的な増幅帯域があり、その近傍に利得傾斜が生じる。この利得傾斜は、EDFAへの信号光及びポンプ光の総入力パワーに従って変化することが知られている。

【0007】 光増幅器の利得の波長特性を補償するために、光フィルタがイコライザとして使用される。但し、光増幅器の平均利得を変化させると利得の波長特性も大きく変化してしまうので、光フィルタを作製した利得ポイントで利得が一定になるような制御を行なう必要がある。

【0008】 一方、光通信システムにおいては、様々な長さの光ファイバ伝送路が敷設されているので、光中継器として使用される光増幅器に入力される信号光のパワーは一定ではない。このため、広い入力パワーダイナミックレンジに対応した光増幅器が要求される。さらに、光ファイバ伝送路で生じる分散を相殺するための分散補償ファイバが用いられることがあり、分散補償ファイバでの損失の変動に応じて光中継器におけるレベルダイアグラムを変更する必要もある。

【0009】 前述のように、光増幅器の利得が一定になるような制御を行なうと、入力信号光パワーが変化すると、これに伴って出力信号光パワーも変化する。しかし、光増幅器の出力側の光ファイバ伝送路に供給する、

とができる信号光のパワーは種々の非線形効果により制限されているので、光増幅器の出力パワーは一定であることが望ましい。

【0010】このような状況に鑑みて、利得の波長特性を一定に維持し且つ広い入力ダイナミックレンジを得るための光増幅デバイスが開発されている。その光増幅デバイスは、第1及び第2の光増幅器と、第1及び第2の光増幅器間に光学的に接続された可変光減衰器とを備えている。自動利得制御(AGC)が第1及び第2の光増幅器の各々に適用され、それにより第1及び第2の光増幅器の各々の利得の波長特性が一定に維持される。さらに、可変光減衰器を用いて第2の光増幅器について自動出力レベル制御(ALC)を行なうことによって、広い入力ダイナミックレンジが得られている。即ち、第1の光増幅器の入力レベルに関わらず第2の光増幅器の出力レベルが一定に維持され、その結果、このデバイスの入力ダイナミックレンジが拡大される。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】しかし、このタイプの光増幅デバイスでは、可変光減衰器により無駄な損失を与えることになるので、効率や雑音特性の点で不利である。特に、分散補償量が大きい場合には、10数kmの分散補償ファイバが必要であり、分散補償ファイバの損失と入力ダイナミックレンジを併せて20dB近くの損失を受けることも考えられるので、増幅中継器としての効率が大幅に劣化する。

【0012】さらに、近年の伝送速度の高速化により、非線形効果(自己位相変調、相互位相変調など)による影響が誤り率を劣化させる原因として顕在化している。特に、伝送速度が40Gbit/s以上では、非線形効果による信号光への影響を極力避ける必要がある。中継器においては、分散補償ファイバで生じる非線形量が最も大きいので、分散補償ファイバへ入力される信号光パワーを下げる必要があり、中継器における雑音指数が劣化する。

【0013】また、信号光の増幅帯域の拡大を目的として、波長の異なる複数のポンプ光源を用いてラマン増幅媒体をポンピングするラマン増幅器が提案されている。ラマン増幅器における利得の波長特性を制御する方法として、ラマン増幅媒体を通過した信号光について光伝送パワーの波長特性をモニタリングするモニタを使用し、各ポンプ光源にフィードバックを行ない波長特性を制御する方法が知られている(特開2001-15845)。

【0014】しかしながら、この方法では、モニタした光パワーのうち隣接チャネルのクロストーク分や自然ラマン散乱光分を補正する必要があり、制御に問題がある。また、高精度に信号光をモニタリングするためにスペクトルアナライザを用いる必要があり、コスト的に不利である。

【0015】よって、本発明の目的は、利得の波長特性を一定に維持し且つ広い入力ダイナミックレンジを得ることができ、しかも増幅効率がよく雑音特性の改善が可能な光増幅のための方法及び装置を提供することである。本発明の他の目的は以下の説明から明らかになる。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明によると、第1及び第2の光増幅ユニット並びに制御ユニットを備えた装置が提供される。第1の光増幅ユニットは、ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む。第2の光増幅ユニットは、第1の光増幅ユニットの後段に光学的に接続され、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む。制御ユニットは、第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように第1の光増幅ユニットの利得を制御する。

【0017】この構成によると、第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されているので、第2の光増幅ユニットにおける利得を一定に維持することができ、全体としての利得の波長特性を一定に維持するのが容易である。また、第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による出力パワー変動が打ち消されるように制御を行なっているので、広い入力ダイナミックレンジを得ることができる。さらに、このような制御により、第1及び第2の光増幅ユニットの間に設けられることがある可変光減衰器での減衰量を軽減若しくは0にすることができるので、効率の向上及び雑音特性の改善が可能になる。

【0018】本発明の他の側面によると、光増幅のための方法が提供される。この方法は、本発明による装置を用いた方法である。より特定的には、本発明による方法は、ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットにより信号光を増幅するステップと、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットにより第1の光増幅ユニットから出力された信号光を増幅するステップと、第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように第1の光増幅ユニットの利得を制御するステップとを備えている。

【0019】

【発明の実施の形態】以下、添付図面を参照して、本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。

【0020】図1を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第1実施形態が示されている。この装置は、ラマン増幅媒体1、光カブラ2、励起光源3、アイソレータ4、励起光源5、光カブラ6、EDF(希土類ドープファイバとしてのエルビウムドープファイバ)7、励起光源8、光カブラ9及びアイソレータ10を備えている。ラマン増幅媒体1の第1端は入力ポート11に接続され、第2端は光カブラ2に接続される。光カブラ

ラ2には、また、励起光源3とアイソレータ4の入力端が接続される。アイソレータ4の出力端と励起光源5は光カプラ6に接続され、EDF7の第1端も光カプラ6に接続される。EDF7の第2端は光カプラ9に接続される。光カプラ9にはまた、励起光源8とアイソレータ10の入力端が接続される。アイソレータ10の出力端は出力ポート12に接続される。

【0021】ラマン増幅媒体1としては、分散補償ファイバや高非線形ファイバを用いることができる。分散補償ファイバを用いる場合、この分散補償ファイバは光ファイバ伝送路の波長分散及び分散スロープを補償する。

【0022】増幅されるべき信号光の波長は、例えば、Sバンド(1450~1530nm)、Cバンド(1530~1570nm)及びLバンド(1570~1610nm)から選択される。何れにおいても、信号光の帯域から約100nm(約13THz)短波長側に励起光源3の波長が設定される。励起光源3の波長は単一であってもよいし、複数であってもよい。

【0023】増幅されるべき信号光は入力ポート11から出力ポート12に向かって伝搬する。励起光源3から出力された励起光は、光カプラ2を介してラマン増幅媒体1にその第2端から第1端に向けて伝搬する。励起光源3として複数波長を用いる場合、各々の波長がラマンストークスシフト量分だけ長波長側にラマン増幅帯域を提供することができるので、増幅帯域を拡大することができる。

【0024】励起光源5の波長は例えば 980 ± 5 nmに設定され、励起光源5から出力された励起光は、光カプラ6を介してEDFにその第1端から第2端に向けて供給される。励起光源8の波長は例えば 1480 ± 10 nmに設定され、励起光源8から出力された励起光は、光カプラ9を介してEDF7にその第2端から第1端に向けて供給される。

【0025】希土類ドープファイバとしてのEDF7はCバンドの信号光を増幅するのに適しており、ドープ元素は増幅されるべき信号光の波長に応じて選択することができる。

【0026】従って、この実施形態では、ラマン増幅媒体1、光カプラ2及び励起光源3が第1の光増幅ユニット13を構成し、励起光源5、光カプラ6、EDF7、励起光源8及び光カプラ9が第2の光増幅ユニット14を構成する。光アイソレータ4及び10は、光増幅媒体を含む光路中に反射器構造が構成されて発振が生じることを防止するために設けられている。

【0027】入力ポート11に供給される信号光のパワーが変動すると、第1の光増幅ユニット13における利得が調整され、それにより、第2の光増幅ユニット14に供給される信号光のパワーが一定になされる。第2の光増幅ユニット14は、高出力パワーを得るために用いられており、利得の波長依存性が変化しないように、利

得一定制御が行なわれることが望ましい。

【0028】特に、波長分割多重信号光を増幅する場合には、励起光源3に複数の波長を用いて、各光信号の出力レベルを調整し、第2の光増幅ユニット14に入力する各光信号のレベルが予め定められた一定のレベルになるように制御することが望ましい。

【0029】ここで、予め定められた一定のレベルとは、全ての波長チャネルが同じ出力レベルであっても良いし、波長チャネル間でレベル偏差があっても良い。但し、レベル偏差を有する場合でも、第2の光増幅ユニット14に入力される各光信号のレベルは、第1の光増幅ユニット13の入力レベル変動にかかわらず一定になるように制御されることが望ましい。

【0030】図2を参照すると、図1に示される装置におけるレベルダイアグラムが示されている。この装置に入力される信号光のパワーの変動を第1の光増幅ユニット13の利得調整により吸収し、第2の光増幅ユニット14は利得一定制御で動作させることを表している。光ファイバ伝送路がSMF(シングルモードファイバ)100kmである場合、中継器に要求される分散補償ファイバは約20kmとなる。この分散補償ファイバをラマン増幅媒体1(図1参照)として使用した場合、分散補償ファイバの損失(約12dB)と入力ダイナミックレンジ7dB(Cバンド、44チャネル-17~-10dBm/ch)とに対応するために、約400mWの励起光のパワーが必要である。これに対して、従来技術による場合、励起パワーが最大800mW程度になることがある。より特定的には次の通りである。

【0031】図3の(A)を参照すると、従来の装置のブロック図が示されている。この装置は、EDFA(エルビウムドープファイバ増幅器)15、光可変減衰器16及びEDFA17をカスケード接続して構成されている。

【0032】図3の(B)は図3の(A)に示される装置におけるレベルダイアグラムである。EDFA15及び17の各々においては、利得の波長特性を一定に維持するために、利得が一定になるように制御が行なわれている。その結果、EDFA15の出力パワーが例えば9dBm/chとなり、最大800mW程度の励起パワーが必要になるものである。

【0033】このように、図1に示される実施形態によると、励起パワーを従来技術と比較して概ね半分にすることができるので、励起光源のコストを大幅に下げることが可能である。

【0034】図4を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第2実施形態が示されている。この実施形態は、図1に示される実施形態と対比して、自然ラマン散乱光モニタ部18と、光カプラ19、20及び21と、パワーモニタ22及び23と、AGCループ24と、A.I.Cループ25と、利得傾斜制御ループ26とが

付加的に設けられている点で特徴づけられる。

【0035】光カプラ19は、ラマン増幅媒体1においてその第2端から第1端に向けて発生する自然ラマン散乱光を主光路から分岐するために用いられる。分岐された自然ラマン散乱光はそのモニタ部18に供給される。モニタ部18は、ラマン散乱光を波長成分毎に分離する光デマルチプレクサ27と、光デマルチプレクサ27の複数の出力のパワーを検出するパワーモニタ28とを含む。パワーモニタ28の数は励起光源3における励起光の波長数と同じに設定される。

【0036】光カプラ20は、第1の光増幅ユニット13から第2の光増幅ユニット14に供給される信号光の一部を分岐し、分岐された信号光はパワーモニタ22に供給される。光カプラ21は第2の光増幅ユニット14から出力される信号光の一部を分岐され、分岐された信号光はパワーモニタ23に供給される。従って、パワーモニタ22及び23の出力に基づいて、第2の光増幅ユニット14における利得が算出可能である。算出された利得に基づいて、その利得が一定になるように、AGCループ24は、第2の光増幅ユニット14を制御する。

具体的には、第2の光増幅ユニット14における励起光源5及び/又は8(図1参照)のパワーが制御される。

【0037】ALCループ25は、パワーモニタ22の出力が一定になるように励起光源3を制御する。具体的には、励起光源3におけるトータル出力パワーが制御される。

【0038】利得傾斜制御ループ26は、自然ラマン散乱光モニタ部の出力に基づいて、励起光源3を制御する。具体的には、自然ラマン散乱光モニタ部18で得られたデータに基づき算出された利得傾斜が一定になるように、励起光源3における複数波長のパワーバランスが制御される。

【0039】従って、この実施形態では、ALCループ25が制御ユニットを構成している。

【0040】図5を参照すると、利得傾斜制御ループ26の具体的構成が示されている。ここでは、光カプラ19に代えて光サーキュレータ29が用いられている。

【0041】光サーキュレータ29から出力された自然ラマン散乱光は、光分岐部30により3つの出力に分配され、各出力は透過中心波長が異なる3つのバンドパスフィルタ31に供給される。バンドパスフィルタ31の出力は3つのパワーモニタ28に供給され、各出力が電気信号に変換される。光分岐部30及びバンドパスフィルタ31は光デマルチプレクサ27(図4参照)を構成している。

【0042】励起光源3は、3つのLD(レーザダイオード)32と、LD32の出力を合成する光マルチプレクサ(MUX)33により合成され、光カプラ2を介してラマン増幅媒体1に供給される。

【0043】チルト制御回路部34は、パワーモニタ2

8の出力に基づき、これらの出力がほぼ同じ値になるように、LD32の各駆動電流のバランスを制御する。

【0044】図6を参照して、図5に示されるバンドパスフィルタ31の通過帯域を説明する。後方自然ラマン散乱光スペクトルは各励起光源の波長から約13.2THz長波長側にピークを有しているため、各ピークに一致するように各バンドパスフィルタ31の通過帯域が設定される。従って、図5で説明したように、チルト制御回路部34がパワーモニタ28の出力に基づいてこのような出力が一定になるようにLD32を制御することによって、第1の光増幅ユニット13における利得傾斜を一定に維持することができる。

【0045】尚、図6の上方には、第1の光増幅ユニット13の出力スペクトルの例が示されている。

【0046】図7を参照すると、本発明による光増幅のための第3実施形態が示されている。この実施形態は、図1に示される実施形態と対比して、第1の光増幅ユニット13と第2の光増幅ユニット14との間に可変光減衰器35が付加的に設けられている点で特徴づけられる。

【0047】図1に示される実施形態では、入力ポート11に供給される信号光のパワーが変化すると、第1の光増幅ユニット13の利得変動量に応じて第1の光増幅ユニット13の出力スペクトルにおけるリップルが増加する。具体的には、信号光入力パワーが10dB/c増加した場合、約0.7dBのリップルが生じる。

【0048】そこで、図7に示される実施形態では、第1の光増幅ユニット13における利得調整量がある一定値に達した場合に、可変光減衰器35により信号光の入力パワーの変動を吸収する。これにより、第2の光増幅ユニット14に輸入される信号光のパワーが一定になる。

【0049】図8の(A)及び(B)はそれぞれ図1及び図7の実施形態における出力スペクトルを示している。各図において、縦軸は出力パワー、横軸は波長である。図1に示される実施形態では、信号入力パワーが変動した場合に出力スペクトルのリップルが比較的大きく生じているのに対して、図7に示される実施形態では、信号入力パワーが同じだけ変化した場合であっても出力スペクトルにおけるリップルが比較的小さく生じていることが明らかである。つまり、中継器出力のチャンネル間偏差をある一定値以内に収める必要がある場合には、図7の実施形態にすることにより可能である。

【0050】尚、何れの実施形態においても、信号入力パワーが基準値である場合には、リップルは殆ど生じない。

【0051】図9を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第4実施形態が示されている。この実施形態は、第1の光増幅ユニット13が前段部36及び後段部37に分割されている点で特徴づけられる。後段部3

10

20

30

40

50

7としては、図1に示される第1の光増幅ユニット13がそのまま用いられており、前段部36は、ラマン増幅媒体1、光カプラ2及び励起光源3にそれぞれ対応するラマン増幅媒体38、光カプラ39及び励起光源を含んでいる。ラマン増幅媒体38の第1端は入力ポート11に接続され、第2端は光カプラ39に接続される。励起光源40からの励起光は、光カプラ39を介してラマン増幅媒体38にその第2端から第1端に向けて供給される。前段部36及び後段部37の間に設けられるアイソレータ48の入力端は光カプラ39に接続され、出力端はラマン増幅媒体1の第1端に接続される。

【0052】ラマン増幅媒体1及び38の何れか一方或いは両方として分散補償ファイバを用いることができる。両方に用いた場合、光ファイバ伝送路の波長分散及び分散スロープの補償に対する自由度が大きくなる。また、この実施形態では、第1の光増幅ユニット13を前段部36及び後段部37に分割しているため、図4に示される利得傾斜制御ループ26及びALCループ25を図9に示される実施形態に適用する場合に、制御対象として励起光源3だけでなく励起光源40をも利用することができ、2つの独立した制御を容易に行なうことができるようになる。

【0053】図10を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第5実施形態が示されている。この実施形態は、図9に示される実施形態と対比して、第1の光増幅ユニット13の前段部36とアイソレータ41との間に可変光減衰器42を付加的に設けている点で特徴づけられる。この実施形態によると、図9により説明した実施形態で得られる効果に加えて、図7で説明したような出力スペクトルのリップルを抑圧することができるという付加的な効果が生じる。

【0054】図11を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第6実施形態が示されている。この実施形態は、図9に示される実施形態と対比して、ラマン増幅媒体1として分散補償ファイバ45が用いられ、ラマン増幅媒体38としてカスケード接続された正分散ファイバ43及び負分散ファイバ44が用いられている点で特徴づけられる。

【0055】正分散ファイバ43及び負分散ファイバ44はそれぞれ正の波長分散及び負の波長分散を信号光に与える。そして、第1の光増幅ユニット13の前段部36における波長分散及び分散スロープが0になり、且つ、必要な利得が得られるように、正分散ファイバ43及び負分散ファイバ44の長さが設定される。

【0056】チャネルあたりの伝送速度が数10 Gbit/s以上になると、光ファイバ伝送路の波長分散及び分散スロープを高精度に補償する必要がある。この実施形態によると、前段部36で生じる波長分散値を0 ps/nmにすることにより、光ファイバ伝送路の分散を補償するための分散補償ファイバ45に余計な波長分散量

を与える必要がなくなり、装置設計が容易になる。

【0057】図12を参照すると、本発明による光増幅のための装置の第7実施形態が示されている。この実施形態は、上流側の光ファイバ伝送路46を分布定数型のラマン増幅器の一部として利用している点で特徴づけられる。

【0058】そのために、励起光源47から出力された励起光を光カプラ48を介して光ファイバ伝送路46にその出力端から供給するようにしている。光ファイバ伝送路46としては、SMF（シングルモードファイバ）或いはNZ-DSF（non-zero分散シフトファイバ）が一般的であり、励起光源47の波長は光ファイバ伝送路46の種類及び信号光の帯域に応じて設定される。このように、適切な波長を有する励起光を光ファイバ伝送路46にその出力端から供給することによって、光ファイバ伝送路46を励起光と逆向きに伝搬してきた信号光に対する増幅作用が得られる。増幅された信号光は、光カプラ48を介して光デマルチプレクサ（DMUX）49に供給される。光DMUX49を用いることによって、信号光を例えばSバンド、Cバンド及びLバンドの3つの帯域に振り分けることができ、各帯域について本発明による光増幅のための装置を並列に適用することができる。

【0059】この実施形態では、1つの帯域について図11に示される第1の光増幅ユニット13の後段部37及び第2の光増幅ユニット14が適用されている。

【0060】従って、光ファイバ伝送路46の伝送路長や伝送路種類による損失の違いを光ファイバ伝送路46を含むラマン増幅器或いは後段部37或いはその両方により吸収することができ、第2の光増幅ユニット14に供給される信号光の入力パワーを一定に保つことができる。従って、光ファイバ伝送路46を含むラマン増幅器が図11に示される第1の光増幅ユニット13の前段部36に相当すると考えることができる。

【0061】図13を参照すると、本発明を適用可能なシステムの実施形態が示されている。このシステムは、光送信機50と光受信機51とを光ファイバ伝送路52により結び、光ファイバ伝送路52に沿って1つ又は複数の光中継器53を設けて構成されている。ここでは、Sバンド、Cバンド及びLバンドのそれぞれのWDM信号光の光増幅について説明する。

【0062】光送信機50においては、各バンドについてそれぞれ複数割り当てられたレーザダイオード54からの光信号が光マルチプレクサ55によりWDM信号光にされ、各WDM信号光は光増幅器56によって増幅されてさらに光マルチプレクサ57によってSバンド、Cバンド及びLバンドを含むWDM信号光にされる。得られたWDM信号光は、光ファイバ伝送路52により光中継器53に送られる。

【0063】光中継器53では、受けたWDM信号光が

光デマルチプレクサ58によりSバンドのWDM信号光とCバンドのWDM信号光とLバンドのWDM信号光とに分けられる。各バンドのWDM信号光は本発明を適用し得る光増幅器59により増幅され、増幅されたWDM信号光は光マルチプレクサ60により再び波長分割多重される。得られたWDM信号光は、光ファイバ伝送路52により光受信機51に送られる。

【0064】光受信機51では、受けたWDM信号光が光デマルチプレクサ61により各バンドのWDM信号光に分けられ、各バンドのWDM信号光は、光増幅器62により増幅されて、さらに光デマルチプレクサ63により個々の光信号に分けられる。各光信号はフォトディテクタ64により電気信号に変換され、伝送データが再生される。

【0065】この実施形態では、光中継器53において、Sバンド、Cバンド及びLバンドの各々に本発明を適用することができるので、極めて広い帯域に関して、利得の波長特性を一定に維持し且つ広い入力ダイナミックレンジを得ることができる。

【0066】図14を参照すると、本発明の有効性を確認するための実験装置のブロック図が示されている。入力ポート11と出力ポート12との間に、第1の光増幅ユニット13としてのDCFRA（分散補償ファイバラマン増幅器）と第2の光増幅ユニット14に相当するS-band EDFA（Sバンドのエルビウムドープファイバ増幅器）とを設けている。DCFRAにおいては、2本のDCF（分散補償ファイバ）がラマン増幅媒体として用いられ、それぞれを後方励起するために2台の励起光源としてのpumping LD（励起レーザダイオード）が用いられている。また、EDFAにおいては、EDFを前方励起及び後方励起するために2台の励起光源としての0.98 μ m LDが用いられている。そして、必要経路中に光アイソレータが適宜設けられている。

【0067】EDFAにおいては、各々Cバンドで発生するASE（自然放光雑音）を遮断し、0.98 μ m帯の励起光を透過するASE suppressing filter（ASE抑圧フィルタ）をEDFの途中に複数個（例えば4個）設けている。これにより、EDFを使用したSバンドの光増幅が可能になる。

【0068】DCFRAにおいては、本発明に従って各励起波長のパワー分配を調節することによって所望の利得の波長特性を得ることができ、また、総励起パワーを調節することによって入力ダイナミックレンジを吸収することができる。EDFAにおいては、EDFの段数はEDFAの利得から最適な段数を設定することが望ましい。例えば、20dB程度の利得を得るには5段構成が効率及び雑音の点から最適である。

【0069】図15を参照すると、図14に示されるEDFAにおける利得及びNF（雑音指数）の波長特性が

示されている。図から明らかなように、利得においては15dB、雑音指数では10dBもの波長依存性がある。このEDFAのみで信号光の増幅を行なった場合におけるこれらの波長依存性を相殺するために、この実験では、DCFRAにおける励起パワー及びその分配が調節された。

【0070】図16を参照すると、利得及びNFの波長特性が示されている。Hybrid gainは全体としての利得の波長特性、DCFRA gainはDCFRA単独での利得の波長特性、Hybrid NFは全体でのNFの波長特性、DCFRA NFはDCFRA単独でのNFの波長特性を示している。

【0071】DCFRA及びEDFAを効果的に組合せることによって、利得の波長特性を5dB程度まで抑圧することができ、雑音指数については波長についてはほぼ平坦にすることができるものである。

【0072】図4の第1の光増幅ユニット13の信号光入力側からのラマン散乱光モニタの構成及図5の構成は、図7の第1の光増幅ユニット13、図9の第1の光増幅ユニット13（前段部36及び後段部37）、図10の第1の光増幅ユニット13（前段部36及び後段部37）、図11の第1の光増幅ユニット13（前段部36及び後段部37）、図12の第1の光増幅ユニット13（前段部36（光ファイバ46、励起光源47及び光カプラ48からなる部分）及び後段部37）、図14のDCFRAの利得制御のためのモニタとして用いることができる。

【0073】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、利得の波長特性を一定に維持し且つ広い入力ダイナミックレンジを得ることが可能になるという効果が生じる。また、その状態で、光増幅のための装置に含まれることがある可変光減衰器の減衰量を軽減若しくは0にすることができ、増幅効率の向上及び雑音特性の改善が可能になるという効果もある。

【0074】本発明は以下の付記を含むものである。

【0075】（付記1）ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの後段に接続され、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による前記第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように前記第1の光増幅ユニットの利得を制御する制御ユニットとを備えた装置。

【0076】（付記2）前記ラマン増幅媒体は光ファイバであり、前記光増幅媒体はエルビウムドープファイバである付記1記載の装置。

【0077】（付記3）前記第1のポンプ光源は互いに異なる波長を有する複数のポンプ光を出力し、それに

より前記第1の光増幅ユニットの増幅帯域が拡大される付記1記載の装置。

【0078】(付記4) 前記ラマン増幅媒体で生じる自然ラマン散乱光のスペクトルを検出する手段と、検出された前記自然ラマン散乱光のスペクトルに基づき前記複数のポンプ光のパワーのバランスを制御する手段とを更に備えた付記1記載の装置。

【0079】(付記5) 前記制御ユニットは、前記第1の光増幅ユニットのから出力される光のパワーを検出する手段と、検出されたパワーが一定になるように前記ポンプ光のトータルパワーを制御する手段とを含む付記1記載の装置。

【0080】(付記6) 前記第2の光増幅ユニットの光入力パワー及び光出力パワーを検出する手段と、検出された入力パワー及び出力パワーに基づいて前記第2の光増幅ユニットの利得が一定になるように前記第2のポンプ光源を制御する手段とを更に備えた付記1記載の装置。

【0081】(付記7) 前記第1の光増幅ユニットと前記第2の光増幅ユニットとの間に接続される可変光減衰器を更に備えた付記1記載の装置。

【0082】(付記8) 前記ラマン増幅媒体はカスケード接続された第1及び第2のラマン増幅媒体を含み、前記第1のポンプ光源は、前記第1及び第2のラマン増幅媒体をそれぞれ励起する第1及び第2の光源を含む付記1記載の装置。

【0083】(付記9) 前記第1のラマン増幅媒体はカスケード接続された正分散ファイバ及び負分散ファイバを含み、前記第2のラマン増幅媒体は分散補償ファイバである付記8記載の装置。

【0084】(付記10) 前記第1のラマン増幅媒体は光ファイバ伝送路の一部又は全部である付記8記載の装置。

【0085】(付記11) 前記光増幅媒体は希土類ドープファイバである付記1記載の装置。

【0086】(付記12) 前記希土類ドープファイバにドープされる希土類元素はEr, Nd, Tm, Pr, Yb及びDyから選択される一つ以上の元素である付記11記載の装置。

【0087】(付記13) ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットにより信号光を増幅するステップと、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットにより前記第1の光増幅ユニットから出力された信号光を増幅するステップと、前記第1の光増幅ユニットの入力パワー変動による前記第1の光増幅ユニットの出力パワー変動が打ち消されるように前記第1の光増幅ユニットの利得を制御するステップとを備えた方法。

【0088】(付記14) 前記ラマン増幅媒体は光フ

ァイバであり、前記光増幅媒体はエルビウムドープファイバである付記13記載の方法。

【0089】(付記15) 前記第1のポンプ光源は互いに異なる波長を有する複数のポンプ光を出力し、それにより前記第1の光増幅ユニットの増幅帯域が拡大される付記13記載の方法。

【0090】(付記16) 前記ラマン増幅媒体で生じる自然ラマン散乱光のスペクトルを検出するステップと、検出された前記自然ラマン散乱光のスペクトルに基づき前記複数のポンプ光のパワーのバランスを制御するステップとを更に備えた付記13記載の方法。

【0091】(付記17) 前記制御するステップは、前記第1の光増幅ユニットのから出力される光のパワーを検出するステップと、検出されたパワーが一定になるように前記ポンプ光のトータルパワーを制御するステップとを含む付記13記載の方法。

【0092】(付記18) 前記第2の光増幅ユニットの光入力パワー及び光出力パワーを検出するステップと、検出された入力パワー及び出力パワーに基づいて前記第2の光増幅ユニットの利得が一定になるように前記第2のポンプ光源を制御するステップとを更に備えた付記13記載の方法。

【0093】(付記19) 前記第1の光増幅ユニットと前記第2の光増幅ユニットとの間に接続される可変光減衰器を提供するステップを更に備えた付記13記載の方法。

【0094】(付記20) 前記ラマン増幅媒体はカスケード接続された第1及び第2のラマン増幅媒体を含み、前記第1のポンプ光源は、前記第1及び第2のラマン増幅媒体をそれぞれ励起する第1及び第2の光源を含む付記13記載の方法。

【0095】(付記21) 前記第1のラマン増幅媒体はカスケード接続された正分散ファイバ及び負分散ファイバを含み、前記第2のラマン増幅媒体は分散補償ファイバである付記20記載の方法。

【0096】(付記22) 前記第1のラマン増幅媒体は光ファイバ伝送路の一部又は全部である付記20記載の方法。

【0097】(付記23) 前記光増幅媒体は希土類ドープファイバである付記13記載の方法。

【0098】(付記24) 前記希土類ドープファイバにドープされる希土類元素はEr, Nd, Tm, Pr, Yb及びDyから選択される一つ以上の元素である付記23記載の方法。

【0099】(付記25) ラマン増幅媒体及びこれをポンピングする第1のポンプ光源を含む第1の光増幅ユニットと、前記第1の光増幅ユニットの後段に光学的に接続され、光増幅媒体及びこれをポンピングする第2のポンプ光源を含む第2の光増幅ユニットと、前記ラマン増幅媒体で生じる自然ラマン散乱光のスペクトルを検出

する手段とを備えた装置。

【0100】（付記26）前記自然ラマン散乱光は前記第1の光増幅ユニットで増幅されるべき光の入力側より取り出される付記25記載の装置。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は本発明による光増幅のための装置の第1実施形態を示すブロック図である。

【図2】図2は図1に示される装置におけるレベルダイヤグラムである。

【図3】図3の（A）は従来の光増幅器の構成を示すブロック図、図3の（B）は図3の（A）に示される光増幅器におけるレベルダイヤグラムである。

【図4】図4は本発明による光増幅のための装置の第2実施形態を示すブロック図である。

【図5】図5は図4に示される利得傾斜制御ループ26の具体的構成を示すブロック図である。

【図6】図6は図5に示されるバンドパスフィルタ31の通過帯域を説明するための図である。

【図7】図7は本発明による光増幅のための装置の第3実施形態を示すブロック図である。

【図8】図8の（A）は図1の実施形態における出力パワーの波長特性を示す図、図8の（B）は図7に示される実施形態における出力パワーの波長特性を示す図である。

【図9】図9は本発明による光増幅のための装置の第4実施形態を示すブロック図である。

【図10】図10は本発明による光増幅のための装置の第5実施形態を示すブロック図である。

【図11】図11は本発明による光増幅のための装置の第6実施形態を示すブロック図である。

【図12】図12は本発明による光増幅のための装置の第7実施形態を示すブロック図である。

【図13】図13は本発明を適用可能なシステムのブロック図である。

【図14】図14は本発明の有効性を実証するための実験装置を示すブロック図である。

【図15】図15は図14に示されるEDFAにおける利得及びNFの波長特性を示すグラフである。

【図16】図16は図14に示されるEDFA及び全体の利得及びNFの波長特性を示すブロック図である。

【符号の説明】

1 ラマン増幅媒体

3, 5, 8 励起光源

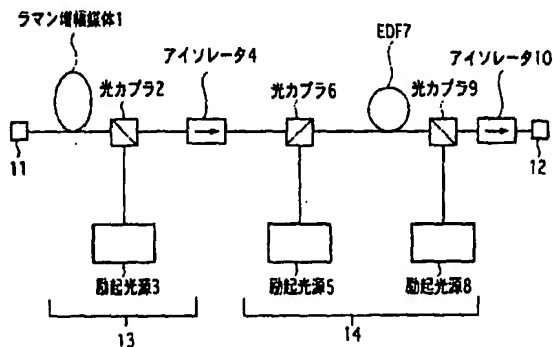
4, 10 アイソレータ

7 EDF

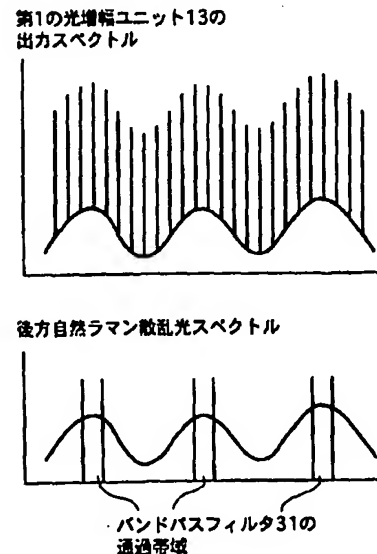
13 第1の光増幅ユニット

14 第2の光増幅ユニット

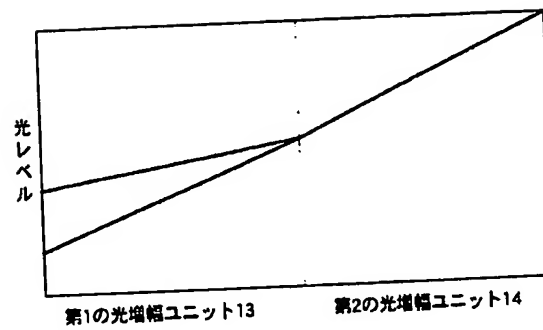
【図1】



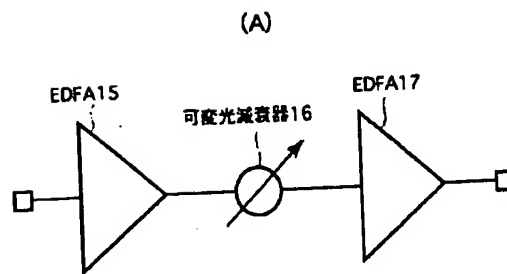
【図6】



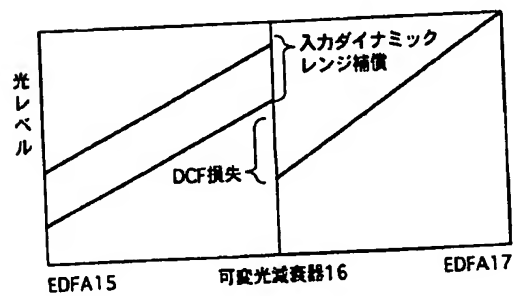
【図2】



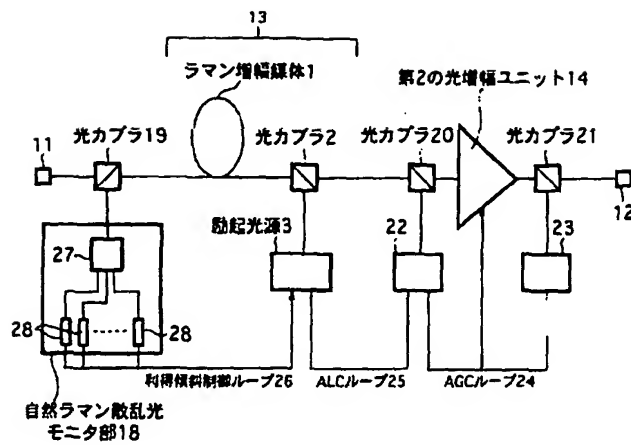
【図3】



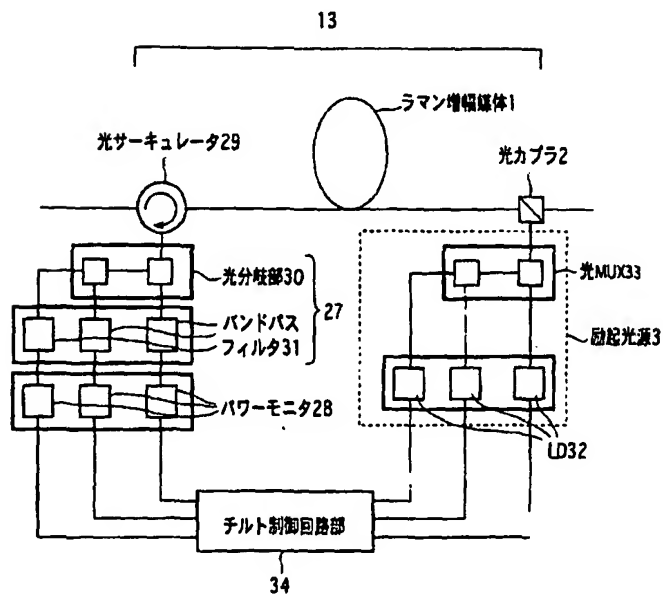
(B)



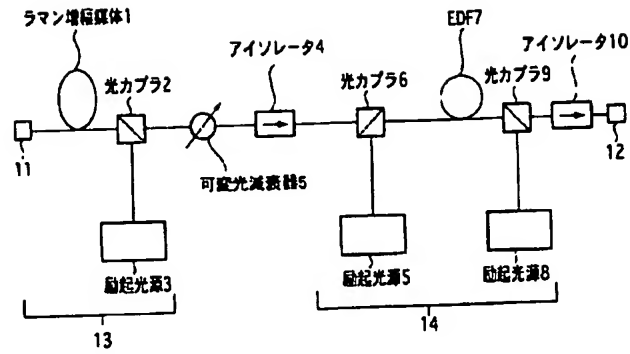
【図4】



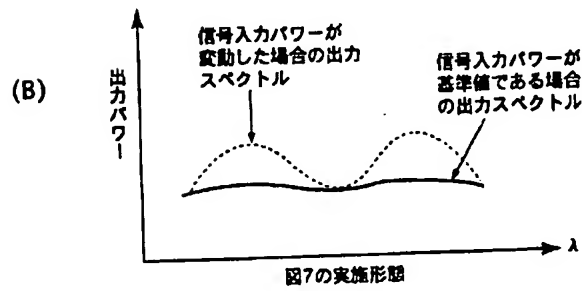
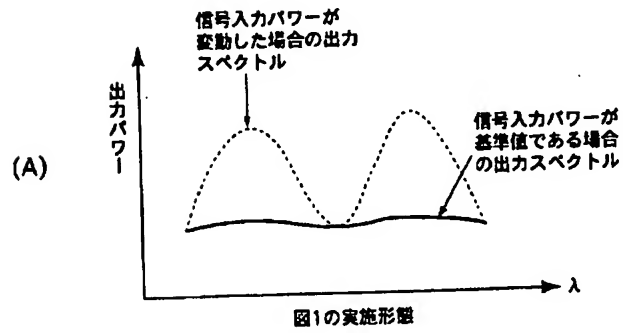
【図5】



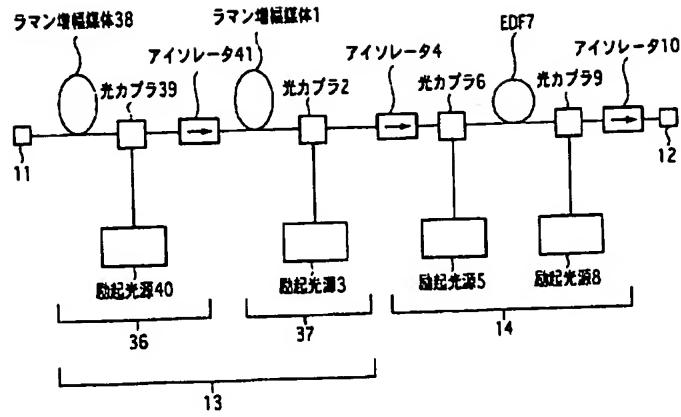
【図7】



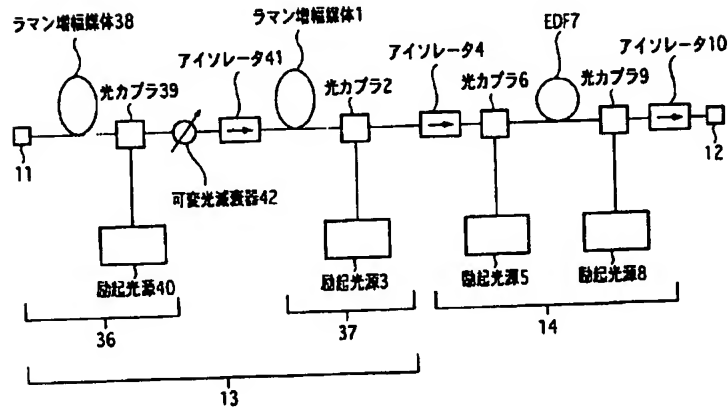
【図8】



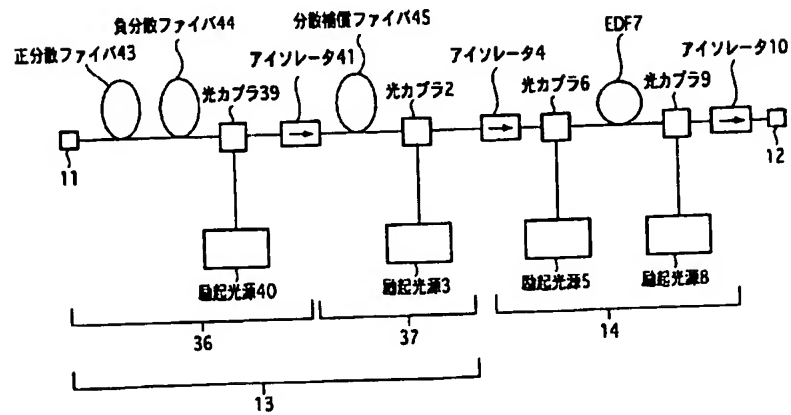
【図9】



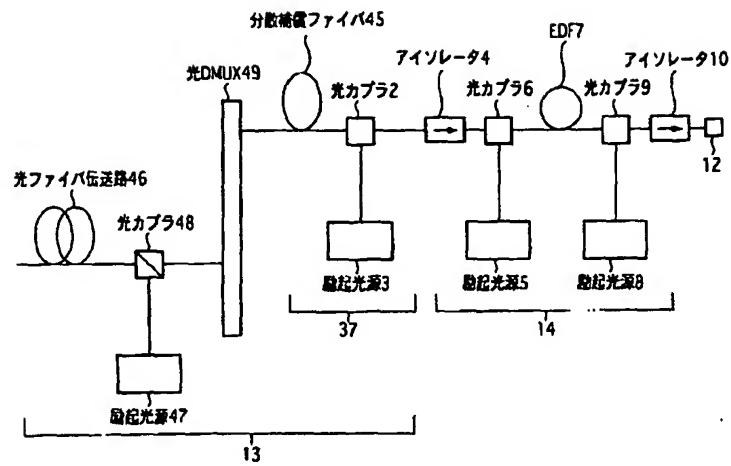
【図10】



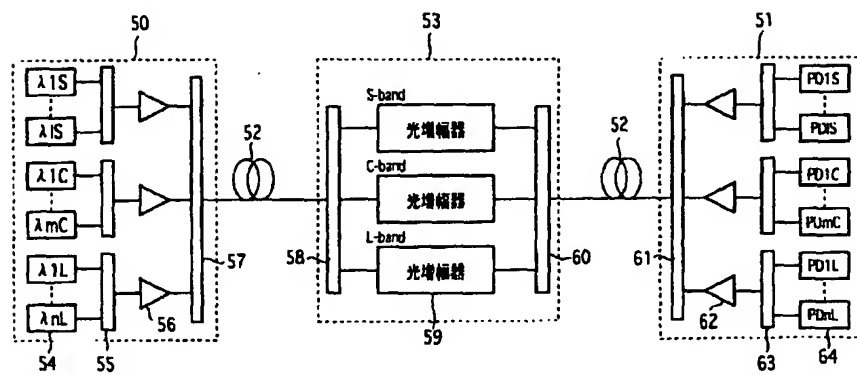
【図11】



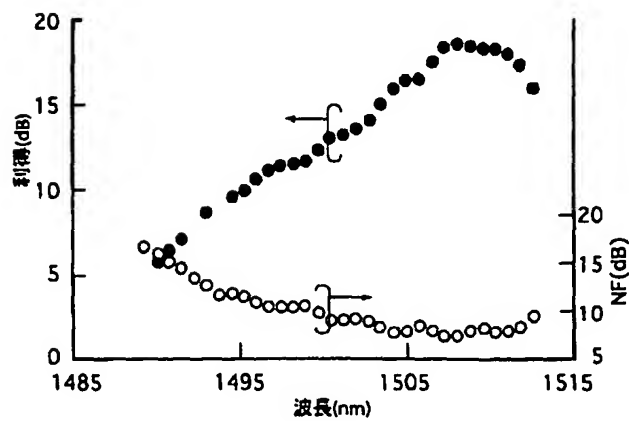
【図12】



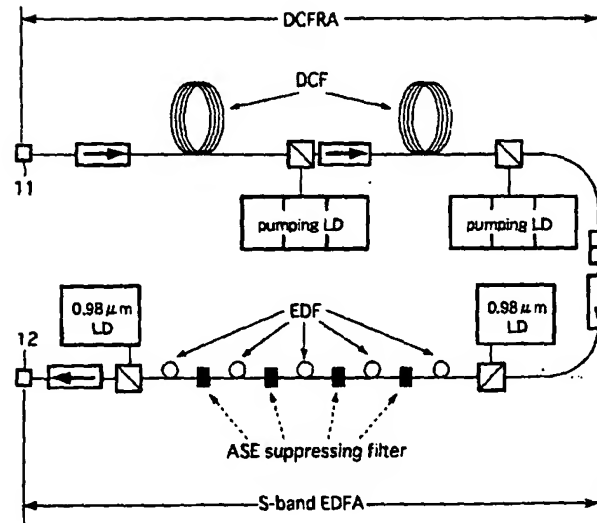
【図13】



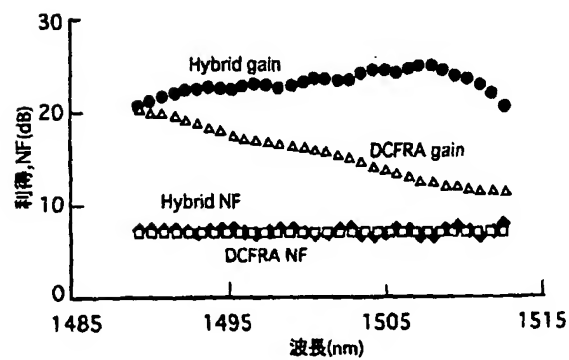
【図15】



【図14】



【図16】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.7

H04B 10/16
10/17

識別記号

F I

H04B 9/00

テーム (参考)

J

(72)発明者 菅谷 靖

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB30 BA01 CA15 DA10

EB15 HA23

5F072 AB09 AK06 JJ05 KK30 PP07

QQ07 YY17

5K002 AA06 BA04 BA05 CA10 CA13

DA31 FA02